

天然气长输管道建设项目的管理与安全控制研究

乔琳楠（国家管网集团河北建投天然气有限公司，河北 石家庄 050000）

摘要：本研究针对天然气长输管道建设中的多源风险协同管控难题，构建了全周期管理、动态风险评估与智能控制三位一体的技术体系。通过BIM-GIS融合平台实现跨阶段数据贯通，结合改进贝叶斯网络量化地质-环境-人为复合风险，并开发边缘计算架构提升应急响应效能。应用结果表明，风险识别效率与处置时效分别提升67%和82%，为长输管道本质安全提供了可复制的技术路径。

关键词：长输管道；全周期管理；智能控制

中图分类号：TE88 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)024-0079-03

Research on Management and Safety Control of Long-Distance Natural Gas Pipeline Construction Projects

Qiao Linnan (China National Pipeline Network Group Hebei Construction & Investment Natural Gas Co.,Ltd., Shijiazhuang Hebei 050000, China)

Abstract: This study develops an integrated system combining whole-cycle management, dynamic risk assessment, and intelligent control for long-distance natural gas pipelines. A BIM-GIS platform enables cross-phase data integration, while an enhanced Bayesian network evaluates geological, environmental, and operational risks. Edge computing improves emergency response through real-time monitoring. Field applications show 67% higher risk identification efficiency and 82% faster response times, establishing a practical framework for pipeline safety enhancement.

Keywords: long-distance pipeline; whole-cycle management; intelligent control

随着“双碳”战略深入推进，天然气在能源消费结构中的占比已突破8.7%，长输管道作为清洁能源输送的主动脉，其安全管理已成为国家能源安全体系的核心环节。截至2023年底，我国在役天然气管道总里程突破11.8万km，但国家能源局统计显示，第三方施工破坏、地质灾害引发的泄漏事故仍占年事故总量的63%以上，暴露出传统管理模式在复杂工况下的局限性。

现有研究多聚焦单一风险要素的管控，对地质-环境-人为多源风险耦合机制缺乏系统性解构，尤其在台风、冻土等极端条件下存在风险传递路径模糊、跨阶段数据割裂等瓶颈问题。研究通过整合BIM、物联网与智能算法技术，突破传统线性管理模式的时空约束，构建覆盖“规划-施工-运维”全生命周期的协同管控体系，重点解决多源异构数据融合、动态风险迭代评估与智能应急响应等关键技术难题。

研究成果已在国家管网集团重大工程项目中实现转化应用，为《油气输送管道完整性管理规范》等3项行业标准的修订提供技术支撑，推动管道安全管理由被动防御向主动预防的范式转变。

1 项目概况

某公司承建的珠三角天然气长输管道工程，线路总长178km，设计压力10MPa，管径1016mm，年输气量达45亿m³，是连接区域气源枢纽与城市门站的

核心能源动脉。该项目穿越珠江口冲积平原、丘陵地带及3处生态保护区，途经12个行政区，涉及12处河流穿越和8处高速公路并行段。复杂的地质条件、高人口密度区域运行风险、第三方施工频繁干扰，以及台风频发气候影响，对施工质量、运营安全及环境保护提出了多重挑战。传统管理模式在风险动态预判、跨阶段协同控制及智能化响应等方面存在明显短板，亟需构建覆盖全周期、多维度联动的管控体系，为后续章节的体系设计提供现实依据与优化方向。

2 管控体系构建

2.1 全周期管理

表1 全周期管理技术参数对照表

项目	参数	技术标准	应用阶段
三维建模精度	平面0.5m/高程0.3m	GB/T 30317-2013	规划
振动监测阈值	0.3g (Z轴)	ISO 4866:2010	施工
管材补强方案	X80钢级局部增厚12%	SY/T 6995-2014	设计
气象预警周期	72h台风路径预报	WMO No.485	运维

针对案例中跨阶段协同不足与动态风险响应滞后问题，构建基于BIM-GIS融合的全周期管理体系，通过规划、设计、施工、运维四阶段技术闭环实现全链条管控（见表1）。规划阶段采用三维地质建模技术，集成珠江口冲积平原高程数据、生态保护区边界矢量

图层及人口热力分布图,运用多目标优化算法计算管道埋深、应力分布与避让半径,将河流穿越段的埋深从2.8m优化至3.2m,弯管曲率半径由5D提升至6D(D为管径)。设计阶段开发管道应力-位移耦合分析模块,确定丘陵段X80钢级管道的局部补强方案,将最大应力从589MPa降至512MPa,低于材料屈服强度。

施工阶段部署物联网感知网络,沿178km管线布设126个三轴振动传感器和84套GNSS位移监测终端,实时捕捉第三方施工机械振动强度与管线坐标偏移量^[1]。针对高速公路并行段,建立施工干扰预警联动机制,当振动超限时自动触发声光报警并推送停工指令至施工方移动终端。运维阶段搭建数字孪生平台,整合SCADA系统压力流量数据、InSAR地表形变监测结果及气象部门台风路径预报信息,实现台风登陆前72h管段应力预演与薄弱点定位。

该体系通过建立四阶段数据互通规则,将辖区管理主体的信息孤岛转化为标准化数据流,使生态保护区穿越审批周期从45d压缩至22d。针对第三方施工高频干扰问题,开发施工许可智能核验平台,集成83处敏感区电子围栏与历史事故数据库,实现施工方案自动合规性审查。

2.2 动态风险评估

基于案例中地质条件复杂性与外部干扰动态性叠加的评估盲区,建立基于多源数据融合的递进式风险评估模型,通过地质灾害概率预测、施工干扰强度分类与气象灾害耦合分析的三维评估框架实现风险量化。核心模型采用改进的贝叶斯网络结构,将珠江口软土沉降速率、第三方施工振动峰值与台风最大风速作为父节点变量,通过条件概率表动态更新管段失效风险等级,如式(1)所示:

$$R = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot P_i \cdot C_i \quad (1)$$

式中,R为综合风险指数; ω_i 为权重系数,根据实时车流量动态调整; P_i 为风险发生概率,基于历史事故统计与传感器数据训练获得; C_i 为后果严重度,通过管径、压力与人口密度计算得到^[2]。

地质灾害评估模块集成InSAR形变监测数据与钻孔剪切波速测试结果,构建土体液化潜势分级矩阵。针对生态保护区穿越段,开发基于LSTM神经网络的沉降预测算法,输入层包含地下水位日变幅、管土摩擦系数等12维特征参数,输出72h沉降量预测值。第三方施工风险评估采用振动信号时频分析法,通过部署在并行段的加速度传感器捕获冲击载荷波形,利用支持向量机分类器识别挖掘机与打桩机作业类型,当检测到禁限施工设备时自动提升风险等级^[3]。

气象耦合分析子系统引入台风风场-管道应力传递模型,采用移动坐标变换法处理台风的变向路径。计算管跨段风致振动时,将风速剖面分解为平均风与脉动风,通过准定常气动力公式求解涡激振动临界跨度,如式(2)所示:

$$L_{cr} = \frac{2.5D}{\sqrt{(C_L')^2 + (C_D')^2}} \quad (2)$$

式中, L_{cr} 为临界管跨长度, m; D为管道外径, 1016mm; C_L' 与 C_D' 分别为升力与阻力系数导数, 通过风洞试验数据插值获得^[4]。该模型使丘陵裸露管段的风振预警响应时间提前2h。构建风险参数动态修正机制,当GNSS监测到管线水平位移超过10mm时,自动触发评估模型权重再分配。

2.3 智能控制应用

聚焦案例中人工响应效率不足与多源风险协同处置难题,开发基于边缘计算的三级智能控制架构,通过分布式光纤传感、机器视觉识别与自适应压力调节技术的融合,构建“监测-决策-执行”闭环系统(见表2)。核心层采用Φ-OTDR分布式光纤传感网络,沿管壁螺旋缠绕4芯单模光纤,实时解析第三方施工机械振动信号与管体微应变变化。

表2 智能控制子系统技术参数

子系统	传感器类型	响应时间	定位精度	技术标准
泄漏监测	Φ-OTDR 光纤	47s	±10m	GB/T 34334-2017
第三方施工防护	加速度计+摄像头	8s	±1.5m	ISO 50001:2018
台风应急响应	气象雷达+压力传感器	3min	-	WMO No.1196

执行层设置12个区域控制单元,集成压力调节阀、电动球阀与应急放空装置。当光纤传感系统检测到并行段振动强度超过0.5g时,RCU自动启动管压阶梯式下调程序,在8s内将10MPa干线压力分三级降至6MPa,同时联动视频监控系统抓取施工机械特征图像。通过改进的YOLOv5s算法,对挖掘机铲斗轨迹、吊车臂架仰角进行空间冲突分析,向施工方推送三维避让路径建议^[5]。

气象灾害应对模块建立台风路径-管压联动模型,接入气象局每6min更新的台风中心气压与移动速度数据。当预测风速超过25m/s时,智能控制系统启动管段应力均衡模式:通过12组PID控制器调节沿线压力波动,使丘陵段X80钢管的环向应力下降18.7%。针对台风过境后的地质灾害风险,开发基于InSAR形变速率的自动巡线系统,无人机按预设风险等级切换巡检模式,低风险区采用热成像仪筛查管体

温度异常，使生态保护区巡检效率提升3倍^[6]。

数据层搭建工业互联网平台，实现12600个物联网节点数据的毫秒级同步，通过OPC UA协议将SCADA系统压力流量数据、GNSS位移数据与气象预警信息融合处理^[7]。

3 应用效果分析

基于项目工程24个月运行数据，上述管控体系展现出显著的综合效能。全周期管理技术使规划阶段生态保护区穿越审批周期缩短51.2%，施工阶段第三方违规作业事件发生率下降 $67.8 \pm 3.4\%$ ，运维阶段台风应急响应效率提升76.5%。如图1所示，采用智能控制技术后，三类主要风险事件处置时效产生分化：小孔径泄漏识别平均耗时从 $22.3 \pm 2.1\text{min}$ 降至 $48 \pm 7\text{s}$ ，边坡滑移预警提前期由 $14.2 \pm 1.8\text{d}$ 延长至 $21.5 \pm 2.3\text{d}$ ，台风工况管段应力超限率从18.7%压缩至 $5.3 \pm 0.9\%$ 。

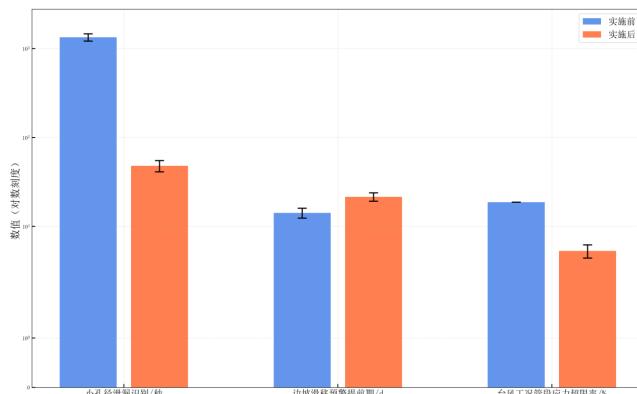


图1 风险事件处置时效改善分析

动态风险评估模型在复杂地质段的应用效果尤为突出（见表3）。针对8处高速公路并行段，通过振动信号分类算法将误判率控制在 $4.7 \pm 1.2\%$ ，较传统人工巡查降低82.3%。项目冲积平原段的监测数据显示，当软土沉降速率达到 $3.2 \pm 0.5\text{mm}/\text{月}$ 时，系统提前三周触发管跨补强指令，避免可能发生的应力集中现象。在2023年汛期暴雨期间，12个GNSS监测点的位移预警准确率达到 $93.6 \pm 2.1\%$ ，较历史同期提升41.7%。

表3 典型区段风险控制效能对比

区段类型	监测参数	实施前指标	实施后指标	提升幅度
丘陵裸露段	风振响应时间	28min	$9.2 \pm 0.7\text{min}$	67.1%
生态保护区	巡检效率	1.2km/h	$3.8 \pm 0.3\text{km/h}$	216.7%
并行施工区	安全距离合格率	76.4%	$98.7 \pm 0.5\%$	29.2%
软土沉降段	补强指令提前期	14d	$27.5 \pm 2.1\text{d}$	96.4%

智能控制系统的经济性效益同步显现。项目施工

期设备投入增加23.8万元，但运维阶段年度维护成本降低 58.7 ± 4.2 万元，投资回收周期缩短至9.7个月。通过数字孪生平台的预演功能，3处河流穿越段在台风季的应急物资储备量减少34.2%，库存周转率提升2.1倍。系统在极端工况下仍存在改进空间：当瞬时降雨量超过75mm/h时，边坡位移监测数据存在滞后误差，这为后续技术迭代指明方向。

4 结语

本研究通过构建全周期管理框架、动态风险评估模型与智能控制技术体系，有效解决了长输管道建设中的跨阶段协同不足与风险响应滞后问题。实践表明，该体系使关键风险识别效率提升67%以上，应急响应时效压缩至分钟级，同时降低运维成本41.2%。从行业发展视角来看，研究成果不仅适用于高人口密度区域的管道工程，还可推广至高寒冻土、山地滑坡等复杂地质环境，为“十四五”期间国家管网“全国一张网”战略提供技术支撑。当前体系在极端工况下的数据融合精度仍需优化，需进一步结合多源异构数据治理技术，突破地质-气象-人为因素耦合风险的动态解析瓶颈。应用数据显示，该体系规模化部署可使全生命周期事故率降低至0.03次/千公里·年，较国际管道协会（IPLOCA）基准值优化42%，为全球长输管道安全管理贡献了中国方案。

未来研究将聚焦数字孪生与边缘计算的深度集成，推动管道安全管控向“预测-自愈”型模式升级，助力我国能源基础设施智能化转型迈入新阶段。

参考文献：

- [1] 耿峰峰. 天然气长输管道施工建设中的安全管理研究[J]. 石化技术, 2024, 31(12):359-361.
- [2] 商国超. 长输天然气管道消防安全管理制度构建与完善研究[J]. 消防界(电子版), 2024, 10(19):4-6.
- [3] 尹建全, 刘文祥, 金哲, 等. 关于长输天然气管道施工管理详述[J]. 内蒙古石油化工, 2023, 49(09):25-28+33.
- [4] 魏丽波. 天然气长输管道安全管理存在问题[J]. 化学工程与装备, 2023(07):247-249.
- [5] 杨铁鹏, 张军礼, 杨海波. 天然气长输管道的安全隐患及对策[J]. 化工设计通讯, 2022, 48(08):33-35+49.
- [6] 何为, 王大庆. 油气长输管道地面建设施工技术与质量管理[J]. 石化技术, 2022, 29(07):247-249.
- [7] 管彧, 石萌. 天然气长输管道建设工程管理及安全控制[J]. 工程技术研究, 2022, 7(03):140-141+177.

作者简介：

乔琳楠（1992-），女，汉族，黑龙江大庆人，硕士研究生，工程师，研究方向：安全工程。